

UM MÉTODO RÁPIDO PARA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DO ENROLAMENTO DO ESTATOR DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS DO TIPO GAIOLA

Jocélio de Sá; João Roberto Cogo; Héctor Arango.

1 - RESUMO

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento e implementação de um método simples e rápido que permite a especificação de motores de indução trifásicos com rotor do tipo gaiola, a partir da análise do comportamento térmico do enrolamento do estator. O método desenvolvido se aplica na especificação da maioria dos motores para acionamentos não controlados, uma vez que o comportamento térmico do enrolamento do estator é que vai definir a solicitação crítica a que o motor será submetido. O método não é válido para acionamentos com elevado tempo de partida, uma vez que neste caso, a solicitação térmica nas barras do rotor também deve ser analisada.

2 - INTRODUÇÃO

A especificação de motores de indução trifásicos, usados em acionamentos não controlados é feita de modo que as seguintes condições sejam atendidas:

- A temperatura do enrolamento do estator não deve ultrapassar o valor limite definido pela classe de isolamento;
- A diferença de temperatura que se estabelece entre as superfícies superior e inferior das barras que constituem o enrolamento do rotor não deve ultrapassar o valor que pode provocar uma solicitação mecânica inadmissível;
- O motor deve poder fornecer o conjugado exigido pela carga nas condições normais de operação.

3 - EQUAÇÃO BÁSICA DO AQUECIMENTO DO ENROLAMENTO DO ESTATOR

A equação básica do aquecimento do enrolamento do estator é:

$$P_j \cdot dt = C \cdot d\tau + A \cdot \tau \cdot dt \quad (1)$$

onde:

P_j - Perdas no estator [W];

C - Capacidade térmica do enrolamento do estator [W . S/°C];

A - Fator de transmissão de calor [W/°C];

τ - Elevação de temperatura [°C];

t - Tempo [s].

A solução da equação, levando-se em conta uma elevação inicial de temperatura τ_0 é:

$$\tau = \tau_0 e^{-\frac{t}{T_A}} + \frac{P_j}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_A}} \right) \quad (2)$$

onde:

τ_0 - Elevação inicial de temperatura [°C];
 T_A - Constante de tempo de aquecimento [s].

$$T_A = \frac{C}{A} \quad (3)$$

Se o motor é desligado, a elevação de temperatura (no caso, redução de temperatura), será definida por:

$$\tau_0 = \tau e^{-\frac{t}{T_R}} \quad (4)$$

τ - Elevação de temperatura do enrolamento do estator no instante do desligamento;
 T_R - Constante de tempo de resfriamento.

4 - EQUAÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DO PERFIL DE TEMPERATURA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR

A determinação do perfil de temperatura do enrolamento do estator pode ser feita admitindo-se duas situações distintas:

- O regime de operação do motor é cíclico;
- O regime de operação do motor é aleatório.

4.1 - OPERAÇÃO CÍCLICA

A FIGURA 1 ilustra o perfil de elevação de temperatura alcançado.

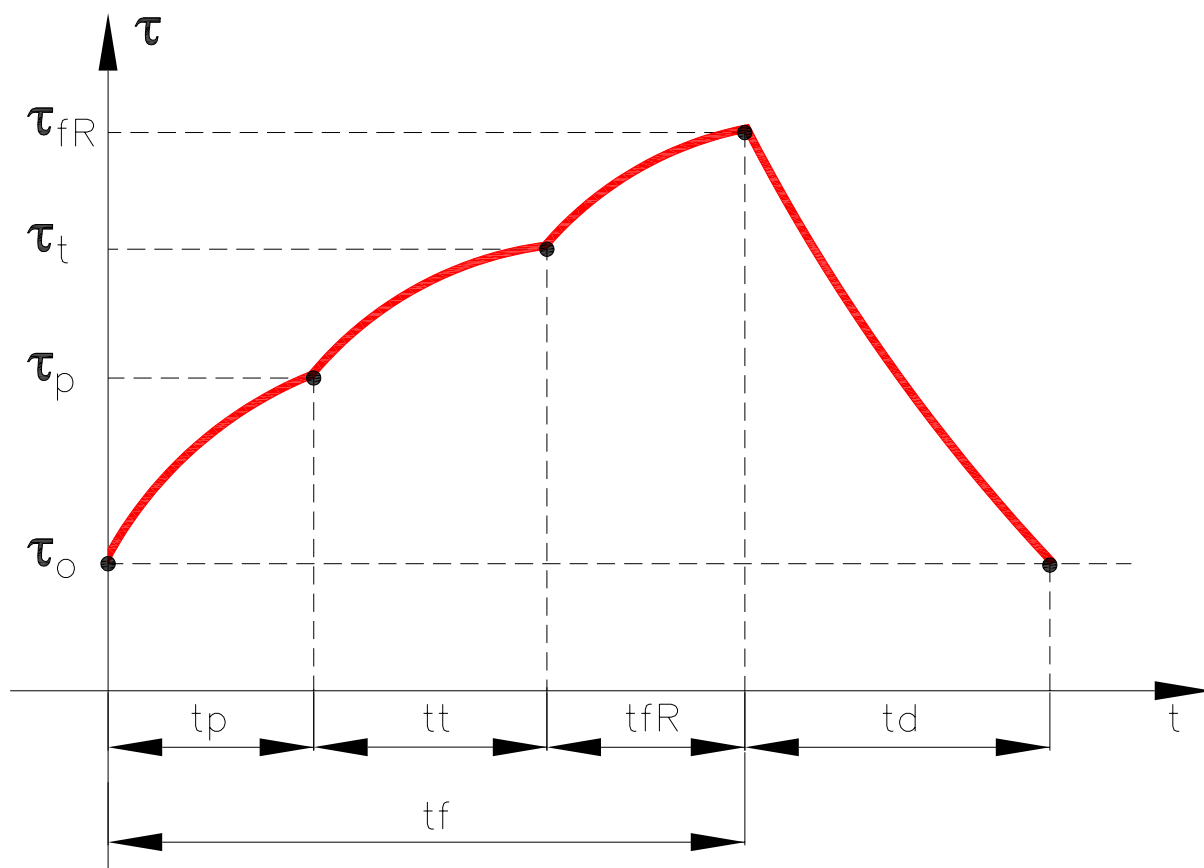


FIGURA 1 - PERFIL DE TEMPERATURA PARA OPERAÇÃO CÍCLICA, JÁ ALCANÇADO O EQUILÍBRIO

Na FIGURA 1 tem-se:

τ_o - Elevação de temperatura ao final do período de permanência desligado [°C];

τ_p - Elevação de temperatura ao final do processo de partida [°C];

τ_t - elevação de temperatura ao final da operação em regime [°C];

τ_{fR} - Elevação de temperatura ao final do processo de frenagem elétrica [°C];

t_p - Tempo de partida [s];

t_t - Tempo de operação em regime [s];

t_{fR} - Tempo de frenagem elétrica [s];

t_d - Tempo de permanência desligado [s].

Para que o motor seja, em termos de elevação de temperatura do estator, adequado ao acionamento, deve-se ter:

$$\frac{\tau_t}{\tau_{adm}} \leq 1$$

$$\frac{\tau_{fR}}{\tau_{adm}} \leq 1$$

$$\frac{\tau_o}{\tau_{adm}} \leq 1$$

$$\frac{\tau_p}{\tau_{adm}} \leq 1$$

4.2 - OPERAÇÃO ALEATÓRIA

Neste caso valem as equações apresentadas anteriormente, que, porém, deverão ser repetidas para os diversos estados operacionais até que o equilíbrio térmico seja alcançado.

5 - DADOS DE ENTRADA E DETERMINAÇÃO DAS ELEVAÇÕES DE TEMPERATURA

Os dados de entrada para determinação das elevações de temperatura devem ser obtidos em catálogos de fabricantes ou a partir do tio de operação que o motor vai desenvolver.

Estes dados são indicados a seguir.

- Dados da carga:

P_c - Potência da carga [W];

n_c - Velocidade da carga [RPM];

J_c - Momento de inércia da carga [kg.m^2];

x - Fator que define a variação da carga com a velocidade;

S_d - Número de ligações por hora;

ED - Fator de intermitência;

J_{RED} - Momento de inércia do redutor [kg.m^2];

n_{Red} - Rendimento do redutor.

- Dados do motor que se pretende usar:

P_N - Potência nominal [W];

n_N - Velocidade síncrona [RPM];

U_n - Tensão nominal [V];

I_N - Corrente nominal [A];

I_p - Corrente de partida [A];

n_N - Rendimento nominal;

$\cos\psi_N$ - Fator de potência nominal;

CI - Classe de isolamento;

t_b - Tempo de rotor bloqueado [s];

J_M - Momento de inércia do motor [kg.m^2];

M_p - Relação entre os conjugados de partida e nominal;

M_k - Relação entre os conjugados máximo e nominal.

5.1 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES PARA DEFINIÇÃO DAS ELEVAÇÕES DE TEMPERATURA

Os tempos de funcionamento ($t_f = t_p + t_t + t_{fr}$) e de permanência desligado podem ser obtidos a partir de S_d (nº de ligações por hora) e ED (fator de intermitência), que são definidos pelo tipo de operação do motor.

O tempo de partida pode ser calculado através da equação.

$$M - M_c = \frac{2\pi}{60} J \frac{dn}{dt} \quad (5)$$

Onde:

M - Conjugado desenvolvido pelo motor durante a partida [N.m];

M_c - Conjugado resistente (carga) [N.m];

J - Momento de Inércia total do acionamento [kg.m^2];

n - Velocidade [RPM];

t - Tempo [s].

5.2 - PERDAS NOMINAIS

São as perdas que ocorrem no estator e podem ser definidas por:

$$P_{JN} = P_N \left(\frac{1}{n_N} - 1 \right) - S_N \cdot P_N \frac{n_1}{n_N} \quad (6)$$

onde:

S_N - Escorregamento nominal.

5.3 - PERDAS PARA OS DIVERSOS ESTADOS OPERACIONAIS

As perdas de partida e de frenagem elétrica podem ser divididas em duas parcelas:

- A parcela correspondente as perdas a vazio e que podem ser supostas constantes:

$$P_V = k_O \cdot P_{JN} \quad (7)$$

onde k_O deve ser fornecido pelo fabricante ou tomado com um valor típico dependente da potência e da velocidade do motor.

- A parcela que varia com o quadrado da corrente e que, portanto, depende do estado operacional do motor (partida ou frenagem) e da carga:

$$P_J = P_{JN} \left(\frac{I}{I_N} \right)^2 \quad (8)$$

onde I é a corrente correspondente ao estado operacional.

6 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Seja especificar um motor de indução trifásico com rotor do tipo gaiola que deve acionar uma carga com os seguintes dados:

$P_C = 50$ [KW];
 $n_c = 1780$ [rpm];
 $J_C = 5$ [Kg.m²];
 $x = 2$;
 $S_d = 30$ [ligações/hora];
 $ED = 60\%$.

A frenagem não é elétrica, verificou-se inicialmente a possibilidade de utilização de um motor de $P_N = 55$ [KW] com os seguintes dados:

$P_N = 55$ [KW];
 $U_N = 440$ [V];
 $n_N = 1775$ [rpm];
 $n_1 = 1800$ [rpm];
 $I_N = 90$ [A];
 $I_p = 504$ [A];
 $n_N = 90\%$;
 $\cos\psi_N = 0,89$;
 $CI = B$;
 $t_b = 15$ [s];
 $J_M = 0,9$ [Kg.m²];
 $M_p/M_N = 2,4$ e
 $M_K/M_N = 2,8$.

Foram Obtidos:

$$\frac{\tau_t}{\tau_{adm}} = 1,043; \frac{\tau_o}{\tau_{adm}} = 1,0348; \frac{\tau_p}{\tau_{adm}} = 1,08$$

Concluindo-se que o motor não é adequado.

Verificar-se então a possibilidade de utilização do motor com $P_N=75[\text{KW}]$, com os seguintes dados:

$P_N=75[\text{KW}]$;
 $U_N=440[\text{V}]$;
 $n_N=1780[\text{rpm}]$;
 $n_1=1800[\text{rpm}]$;
 $I_N=120[\text{A}]$;
 $I_p=888[\text{A}]$;
 $\eta_N=90\%$;
 $\cos\psi_N=0,9$;
 $CI=B$;
 $t_b=8,3[\text{s}]$;
 $J_M=1,06[\text{Kg.m}^2]$;
 $M_p/M_N=3,4$ e
 $M_k/M_N=3,4$.

Foram Obtidos:

$$\frac{\tau_t}{\tau_{adm}} = 0,89; \frac{\tau_o}{\tau_{adm}} = 0,88 \text{ e } \frac{\tau_o}{\tau_{adm}} = 0,93$$

Como as relações deram menor que 1, verifica-se que o motor é adequado.

7 - CONCLUSÕES

O método desenvolvido baseia-se em equações bastante simples e as simplificações adotadas são perfeitamente aceitáveis para fins de especificação conforme já verificado em alguns casos reais onde o mesmo foi aplicado.

Este método também pode ser utilizado para motores de anéis, tanto para análise do comportamento térmico do enrolamento do estator quanto do rotor.